

多様な地震動に対するアクティブ免震システムの考案と 駆動制御法に関する研究

埼玉大学大学院理工学研究科 学生会員 古賀 弘将
埼玉大学 正会員 齊藤 正人

1. 背景と目的

従来の **Passive** な免震装置の多くは固有周期が常に一定であるため、周期の異なる多様な地震動に対応するには大きな減衰が必要であった。そこで、免震装置の固有周期を **Active** 制御によって絶えず変化させ、地震動の持つ周期スペクトルに応じた最適な制御を行うことを目指す。本免震装置では従来の免震装置と異なり、建造物の側面空間のゆとりを確保するために、加速度に加えて変位も抑制する。加速度と変位の双方の抑制を行う既往の免震装置として回転摩擦を利用した免震装置¹⁾が挙げられる。しかし、この免震装置は地震動制御後に残留変位を残すことに課題がある。本研究では地震動応答制御装置として深層強化学習によって学習を行った人工知能を活用し、様々な周期特性を有する地震動に対応可能な **Active** 制御免震装置の提案と応答評価を行う。

2. 研究概要

(1) 研究趣旨

地震動による応答を最小化する最適な駆動制御を強化学習によって導き、AI 制御駆動免震装置を実装する。

(2) 解析プログラム

本研究の深層強化学習のフレームワークには PFN 社の Chainer を用い、解析は物理エンジン pyODE(Open Dynamics Engine)上で行う。

(3) 深層強化学習

深層強化学習にはノード数 1000 個、中間層 1 層を有する DDQN(Double Deep Q-Network)を活用する。深層強化学習ネットワークの出力である建造物の相対変位及び絶対加速度の小ささに応じて報酬を与え、入力パラメータである駆動制御変位と建造物応答の相関、すなわち深層強化学習ネットワークの重みを最適化する。

3. 研究方法

キーワード アクティブ制御 免震 駆動制御 深層強化学習 AI 人工知能

連絡先 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学大学院理工学研究科 TEL048-858-3427

(1) 解析モデル

pyODE 上に作成する解析モデルを図-1 に示す。Body1 は質量 0.2t、縦横 1m、高さ 1.5m の直方体構造物であり、X 方向に地震動を入力する。Body2, 3 はスライダであり、深層強化学習によってコンピュータ制御されたアクチュエータに接続され、1/1000 秒毎に 0.1mm ずつ上下に動かすことができる。本免震装置はスライダが上下に動くことで X 方向とバネとの間に角度が生じて免震装置の固有周期が絶えず変化する。

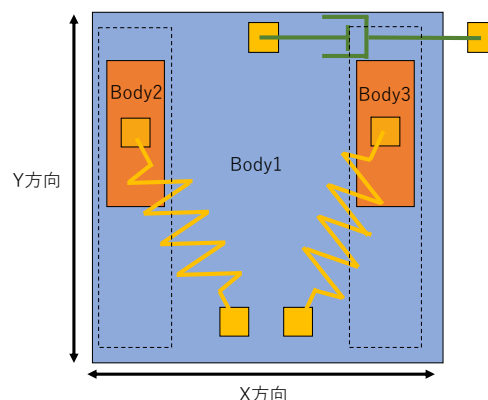


図-1 Active 免震モデル

(2) 解析方法

深層強化学習の入力パラメータは建造物と床の相対変位 D1 および絶対加速度 A1、スライダ変位 D2 を必須のパラメータとして、合わせて追加する建造物の相対速度 V1 と入力地震動の加速度 A0 の有無によって制御がどの程度変わるのかを比較する。スライダを動かさない固有周期固定のモデル (**Passive** モデル) との制御を比較することで (1) 解析モデル (**Active** モデル) の性能を確かめる。

(3) 入力地震動

入力地震動には断層近傍地震として新潟県中越地震にて小千谷市で観測された地震動(小千谷地震動)を、長周期地震動として名古屋市三の丸地区における耐震改修用に作成された東海東南海地震の予測波(三の丸地震動)を用いる。

4. 解析結果

入力パラメータによる比較と Passive モデルとの比較の解析をそれぞれ50回行い、そのうち後半20回の結果を図-2, 図-3に示す. 図-2, 図-3は制御結果の絶対加速度と相対変位をプロットしたものである. 横軸は許容加速度 3.0m/s^2 に対する絶対加速度を百分率で, 縦軸は許容変位 0.3m に対する相対変位を百分率で表示してある. 図-3の Active モデルの入力パラメータは D1, A1, D2, V1 の4つである. また, C は減衰係数であり単位は kNs/m である.

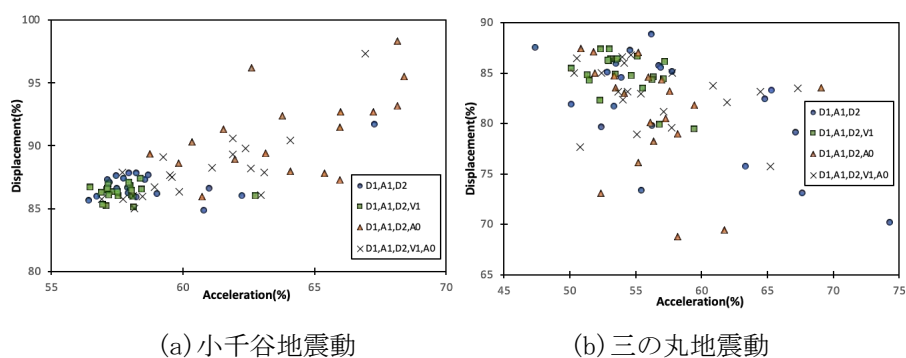


図-2 入力パラメータごとの比較

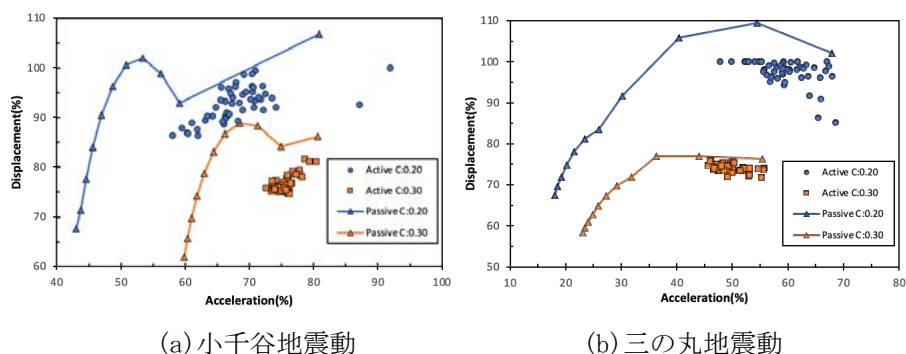


図-3 Passive モデルと Active モデルの比較

5. 考察

(1) 入力パラメータによる比較

最もばらつきの小さい結果は D1, A1, D2, V1 を入力した制御であった. 一般にパラメータ数が多いほど制御の収束に学習回数を要すると考えられるにも関わらず, V1 を加えた方が収束したことからも構造物の相対速度 V1 は非常に重要なパラメータであることを示している. 三の丸地震動では A0 を入力した制御結果のいくつかが高みの結果を示したが, V1 を入力した結果も著しく性能が悪いとも言えず, 免震装置の安定性を考慮すれば V1 を入れた方が良いと考えられる.

(2) Passive モデルとの比較

等しい減衰の Passive モデルの結果と比較すると加速度, 変位ともに Active 制御が上回る結果を示した. 小さな減衰ほど Passive 制御と Active 制御の結果に開きがあり, Active 制御の恩恵が大きい. Passive 制御と比べて優れた結果を示した Active 制御であるが, 図-3(a)の Passive モデルの結果は固有周期 5.0s 以上で加速度と変位がともに小さくなっている. このことから最適な制御は固有周期 5.0s 以上となるようにスライダを動かすことであると考えられるが, 結果は固有周期 3.0s 付近に収束している. Active モデルが最適解を導けない原因は 3.0s 付近の固有周期にあるスライダが 5.0s 以

上に至るには応答変位が卓越している 4.0s 付近を通過しなければならないことにあると考えられる. 本研究の Active 制御は現在の固有周期とそれを微小変化させた後の固有周期を比較しながら, 次の時刻の最適な固有周期を決定するシステムである. そのため 3.0s 付近に位置しているスライダは制御を悪化させる 4.0s 方向への長周期化は行わず, 固有周期 5.0s になるようにスライダを動かすことができないと考えられる.

6. 結論

本研究では最適な入力パラメータは構造物の相対変位 D1 および絶対加速度 A1, スライダ変位 D2, そして構造物の相対速度 V1 の4つであるという結論に至った. Active 制御と Passive 制御を比較すると減衰が小さいほど Active 制御が効果的であった. Active 制御は Passive 制御以上の成果を示したが, 地震動の種類によっては一時的に応答が減少する周期帯に収束し, 最適解が局所的な解に収束するという課題を残した.

7. 参考文献

- 1) Masato Saitoh, An external rotary friction device for displacement mitigation in base isolation systems. Struct. Control Health Monit.2014; 21: 173-188